

Artículo

FBRM como técnica de control para reutilización de aguas en generación eléctrica

Ana Pérez¹, Antonio Tijero², María de la Menta Ballesteros¹ y Ana Moral^{1*}¹ Departamento de Biología Molecular e Ingeniería Bioquímica, Ctra. de Utrera, km. 1, Universidad Pablo de Olavide, 41013 Sevilla. E-mail: amoram@upo.es² Departamento de Ingeniería Química, Av. Complutense s/n, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid.**Palabras clave:** FBRM, reutilización de aguas, generación eléctrica

RESUMEN

La reutilización de aguas residuales para los procesos productivos de las industrias de generación eléctrica constituye un elemento clave en sus políticas medioambientales y económicas. El objetivo de este estudio es el control y optimización de los procesos de coagulación-floculación (mejorados con una etapa posterior de ablandamiento y precipitación) como método de depuración de aguas para su posterior reutilización en los sistemas de refrigeración de una industria de generación eléctrica. Para la optimización de la etapa de floculación/precipitación, se realizó la monitorización en continuo del tamaño medio de cuerda de los flóculos mediante una sonda FBRM. De los datos obtenidos se determinó el punto idóneo de adición de floculantes que permitió optimizar su dosis y de este modo, minimizar efectos no deseados, como ensuciamiento de las aguas y formación de flóculos adherentes.

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos en nuestro planeta son limitados y valiosos. Hoy en día, garantizar el acceso a este recurso es un factor clave para la calidad de vida de las personas y el desarrollo de las actividades económicas sobre el territorio. Tras la aprobación del Real Decreto sobre el Plan Hidrológico Nacional [1], se promueve con carácter prioritario la desalación y reutilización de aguas residuales en el conjunto de las cuencas deficitarias, como soluciones para incrementar la disponibilidad de los recursos hídricos.

En el caso que nos ocupa, las industrias de generación eléctrica, el agua representa un factor clave en su proceso productivo, suponiendo un consumo medio de 63 m³/MWh [2]. Por tanto, el aprovechamiento de este efluente en el entorno industrial, tras un tratamiento adecuado no sólo es conveniente para la producción, sino que se convierte en parte inherente de la actividad desde el punto de vista socio-económico, medioambiental y del marco legal.

La principal captación de agua de las centrales térmicas y de cogeneración, se da en los sistemas de refrigeración, procesos y

servicios auxiliares. Una parte del agua captada es evaporada en las torres de refrigeración, y otra parte el resto se recircula al medio o se devuelve al origen.

La reutilización de aguas para los sistemas de refrigeración, conlleva un tratamiento adecuado para su posterior utilización como agua bruta en sus procesos. En este estudio, se va a profundizar en los procesos de depuración constituidos por una etapa de coagulación-floculación seguida de una etapa de ablandamiento por precipitación, con el objetivo de mejorar la eliminación de materia orgánica y minimizar los procesos de carbotanación y corrosión en las instalaciones.

La primera etapa del tratamiento físico-químico consiste en la adición de agentes oxidantes y desinfectantes (hipoclorito sódico, /dióxido de cloro), así como agentes coagulantes (triclóruo de hierro) en el tanque de mezcla. Los fenómenos de hidrólisis son favorecidos por la disociación de las sales de hierro repercutiendo directamente en la disminución de la turbidez y el color [3,4]. Otra consecuencia directa, es la disminución en el contenido en materia orgánica bien por precipitación directa o por adsorción de la misma en los hidróxidos metálicos [5].

La segunda etapa consiste en un ablandamiento con hidróxido cálcico para la disminución de la dureza en el agua evitando la formación de incrustaciones [6]. Finalmente, la tercera etapa consiste en la floculación en un tanque de precipitación/floculación, con nucleación en la precipitación del carbonato cálcico, por recirculación parcial del lodo.

La adición de polielectrolitos mejora significativamente adsorción de las partículas negativas de la materia orgánica floculada sobre los precipitados inorgánicos debido a la modificación de las cargas superficiales del hidróxido cálcico [8,9]. La existencia de una etapa previa de coagulación a la etapa de floculación da lugar a un proceso mejorado pero más complejo. En este sistema dual se utilizaba un polímero catiónico de alta densidad de carga y peso molecular medio o bajo junto con una poliácridamida aniónica o catiónica de alto peso molecular. La eficacia y estacionalidad de estos sistemas está condicionado por el orden de adición de los

componentes así como de los intervalos de tiempo entre adiciones [10].

La floculación es, en general, un proceso complejo que es difícil de controlar y que ha sido objeto de estudio en diferentes industrias por diferentes medios, llegando a diferentes conclusiones, a menudo contradictorias. Los primeros métodos se basan en las diferentes tasas de sedimentación de partículas y aglomerados antes y después de la floculación. No obstante, estos métodos proporcionan muy poca información sobre los mecanismos de floculación [7], por lo que resultan necesarios métodos más avanzados para su análisis.

El objetivo de este estudio es el control y optimización de los procesos de coagulación-floculación mejorados con una etapa posterior de ablandamiento por precipitación como método de depuración de aguas para su posterior reutilización los sistemas de refrigeración de una industria de generación eléctrica.

Para optimizar la etapa precipitación/floculación se ha empleado la técnica FBRM “microscopio láser sin imagen o sistema de medida por reflexión de rayo enfocado”. Dicha técnica está basada en una óptica de precisión que utiliza un sensor de que mide los pulsos de reflexión sobre las partículas en suspensión de un haz láser focalizado. El equipo utilizado es el FBRM M500P fabricado por Lasentec Mettler Toledo, en Seattle, EE.UU [11].

Esta metodología proporciona la distribución de la longitud de cuerda de las partículas en suspensión en tiempo real y permite estudiar la estabilidad de los flóculos y la resistencia a fuerzas de cizallamiento, tendencia a la re-floculación y la reversibilidad de los flóculos. Además, permite establecer la dosis óptima de cualquier polímero y el mecanismo y cinética de floculación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Estudio de agregación de partículas

Para la optimización de la etapa precipitación/floculación se empleó una técnica basada en la utilización de un sensor que mide los pulsos de reflexión sobre las partículas en suspensión de un haz láser focalizado. El equipo empleado es el FBRM M500P fabricado por Lasentec Mettler Toledo, en Seattle, EE.UU [11].

La técnica FBRM proporciona la distribución de la longitud de cuerda de las partículas en suspensión en tiempo real. Dicha distribución está condicionada por el tamaño, forma y concentración de las partículas y nos permite monitorizar on-line el proceso de floculación a escala industrial y de laboratorio.

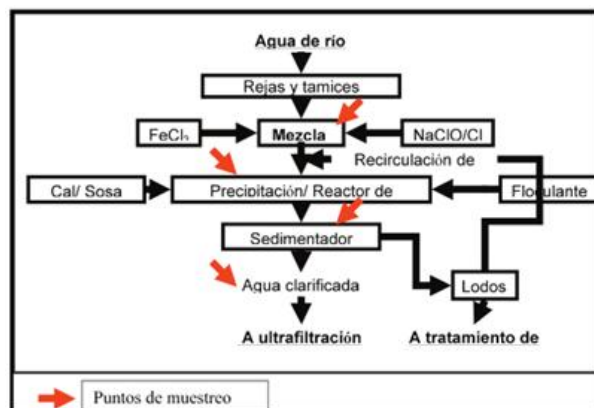


Figura 1. Puntos de muestreo. Se muestra el esquema del sistema de tratamiento de aguas de la industria de generación eléctrica estudiada.

Las flechas rojas indican los puntos de muestreo con FBRM del sistema.

Los puntos de muestreo que se reflejan en la figura 1, se establecieron como puntos de control críticos del sistema. Este muestreo nos permitió evaluar el lugar más conveniente para la instalación del equipo de medida de FBRM en función de la estabilidad y sensibilidad del sensor para las realizar sus medidas de la distribución de tamaño medio de cuerda con la menor interferencia del sistema.

2.2 Descripción del sensor implantado on-line

El FBRM (Focused Beam Reflectance Measurement) se basa en la reflexión de un haz de luz láser que enfoca en un punto de la suspensión a medir. Este rayo enfoca y gira a gran velocidad escaneando las partículas que se encuentra a su trayectoria circular.

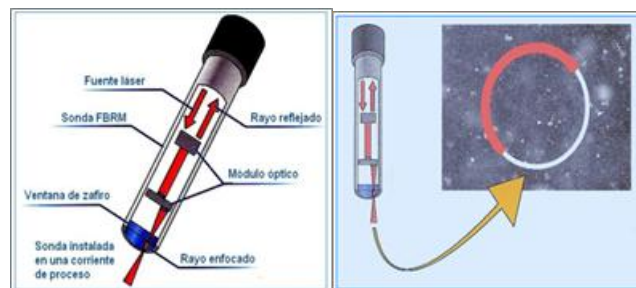


Figura 2. Esquema del sensor FBRM. Se describe los componentes del sensor y su trayectoria.

Cuando el rayo láser enfocado encuentra una partícula en su trayectoria, se produce un pulso de luz reflejada, proporcional a la longitud de partícula interceptada. La duración de cada pulso es proporcional a longitud de partícula interceptada para una velocidad constante de rotación de rayo láser, permitiendo calcular los tamaños de cuerda de las partículas. Se puede observar la evolución de la distribución de tamaños de partícula y sus agregados con la adición de cualquier compuesto, así como la interacción entre el agente químico utilizado y cada uno de los compuestos de la suspensión.

El software del equipo permite opciones configurables por el operario; la distribución de tamaños medios de cuerda puede reflejarse como número de cuerdas en cada intervalo, como porcentaje sobre el total de cuerdas leídas, y se puede observar la curva normal o acumulativa, así como aplicar distintas ponderaciones a la distribución. A partir de un análisis estadístico posterior pueden establecerse consideraciones sobre los procesos de aglomeración o dispersión de las partículas y/o flóculos.

2.3 Caracterización de cargas superficiales de las partículas coloidales en diversos puntos del proceso.

La agregación de partículas está fuertemente condicionada por las cargas coloidales de las partículas coloidales y por el potencial ζ de la suspensión. Los potenciales ζ se determinaron mediante el detector de carga Mütek PCD 03.

Para la determinación de las cargas superficiales se estudió la demanda catiónica, es decir, la carga eléctrica equivalente positiva necesaria para neutralizar las cargas, en nuestro caso negativas, de las aguas en distintos puntos del proceso. La determinación de la demanda catiónica se efectúa mediante la titulación de las aguas empleando un polielectrolito de signo contrario y carga conocidas y se realizó mediante un titulador CRISON conectado a detector de carga Mütek PCD 03.

El punto de equivalencia se alcanza cuando el detector mide potencial ζ cero.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estudio de agregación de partículas

Se realizaron medidas en diversos puntos de la fábrica (figura 1) obteniéndose los valores del tamaño medio de cuerda que se exponen a continuación. Según reflejan los resultados, el reactor de floculación es la zona óptima para realizar un estudio de los agregados de partículas ya que presenta el mayor tamaño medio de cuerda.

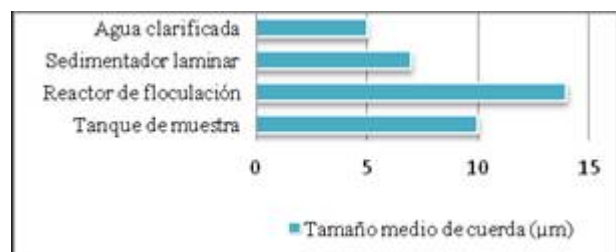


Figura 3. Tamaño medio de cuerda en los diferentes puntos de muestreo.

3.1.1 Estudio la formación de flóculos en el reactor de floculación

A continuación, se procedió a la monitorización de la distribución de tamaños medios de cuerda mediante la instalación de la sonda

FBRM en el reactor de floculación. Aunque la sedimentabilidad y filtrabilidad de los precipitados obtenidos fue satisfactoria, los tamaños medios de flóculos fueron comparativamente bajos respecto a lo que cabe esperar en este tipo de procesos de coagulación-floculación. La cantidad de partículas respecto al tamaño de cuerda se muestra en la figura 4 donde se puede observar que el mayor porcentaje de partículas son de tamaño menor a 10 µm.

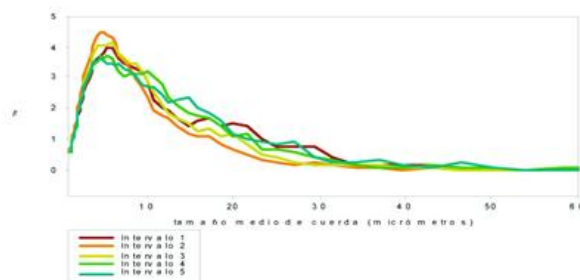


Figura 4. Cantidad de partículas (%) respecto al tamaño de cuerda.

3.2 Caracterización de las aguas en diversos puntos de muestreo

La tabla 1 muestra las diferentes demandas catiónicas en cada uno de los puntos que se tomaron en el muestreo. Como puede observarse, las suspensiones a lo largo del tratamiento son aniónicas. Tras la adición del coagulante catiónico, se detectó un ligero aumento de la DC, que puede ser debido a la adsorción de iones sobre el gel de hidróxido de hierro formado. Una vez adicionado el floculante de carácter aniónico junto con la disolución de hidróxido cálcico, se observó una disminución de la DC y el comienzo de la precipitación de los carbonatos aniónicos. Este fenómeno puede atribuirse a la interacción entre las cargas negativas y los flóculos que provocan una disminución de la superficie en detrimento del reactivo accesible de titulación. La DC del clarificado aumenta significativamente, lo que puede deberse a que parte de las partículas negativas en dispersión se liberen por agitación o bien, que estas partículas pasen a la zona superior de las balsas, donde se toma la muestra.

Tabla 1. Demanda catiónica (DC)

Punto Muestreo	DC(equivalentes)
Agua de entrada	70
Tras adición de coagulante	79
Tras adición de floculante	30
Tras adición de floculante reposo	53
Clarificado	75

El mecanismo de fijación a la superficie de las partículas en suspensión se produce por adsorción física. Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interaccionan generando una fuerza de repulsión (potencial de repulsión) y por

otro lado, existe un potencial de atracción, de modo que el floculante es fijado a la superficie del flóculo mediante mecanismos de interacción similares a las fuerzas de Van der Waals o por polaridad de las moléculas de agua retenidas, alcanzando finalmente un equilibrio entre el floculante adsorbido y el remanente en disolución, correspondiendo la relación final a un equilibrio isoterma [12].

Los floculantes aniónicos, especialmente a pH alcalino muestran una baja tendencia a fijarse sobre los precipitados aniónicos. Para alcanzar una significativa fijación sobre las superficies coloidales, se ha de incrementar la dosis y con ello, la cantidad de floculante residual en las aguas, aumentando el ensuciamiento de membranas y fijándose sobre las superficies, especialmente a las que tienen cargas positivas, o en su caso, a las eléctricamente neutras [10].

4. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra la viabilidad del uso de la técnica FBRM, para el estudio de optimización de los mecanismos de floculación en aguas residuales para su posterior reutilización en una fábrica de generación eléctrica. Esta técnica nos proporciona información útil sobre distribución del tamaño medio de cuerda de las partículas, dosis óptima y procesos de aglomeración y dispersión de partículas.

En los ensayos realizados, el tamaño de los flóculos es menor de lo que cabría esperar, debido a los agentes de floculación empleados. Un exceso de floculante sumado a la recirculación de carbonato, puede originar un efecto no deseado quedando fijado a las paredes mediante flóculos adherentes.

Cuanto más débiles son las interacciones para una determinada masa de floculante adsorbido, mayor es la concentración remanente en equilibrio en las aguas. Sin embargo, para alcanzar una concentración óptima, se ha de incrementar la dosis de floculante aniónico, del que, como se ha señalado, una parte considerable, no se adsorbe y queda en disolución, provocando fenómenos de ensuciamiento calcáreo. Asimismo, la velocidad de sedimentación y filtrabilidad es adecuada, así como la deshidratación de los lodos de precipitación.

Los beneficios previsibles de la aplicación de la técnica FBRM son la mejora en la velocidad de sedimentación, lodos más fácilmente deshidratables, optimización del consumo de polielectrolitos y la reducción de la formación de depósitos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Real Decreto. Ley 2/2004 de 18 de junio, por el que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.
- [2] Gleick, P. H. (2000) The world's water 2000-2001, the biennial report on freshwater resources. Island Press, Washington.
- [3] Mattson, S. (1928) Cataphoresis and the electrical neutralization of colloidal material. *Journal of Physical Chemistry*, **32**, 1532-1552.
- [4] Bottero, J.Y., Manceau, A., Villieras, F. and Tchoubar, D. (1994) Structure and mechanism of formation of FeOOH (Cl) polymers. *Langmuir*, **10**, 316-319
- [5] El Samrani, A. G., Lartiges, B. S., Montargès-Pelletier, E., Kazpard, V., Barrès, O. and Ghanbaja, J. (2004) Clarification of municipal sewage with ferric chloride: the nature of coagulant species, *Water Research*, **38**: 756-768.
- [6] Yan, M. Wang, D., Ni, Jinren, Qu, J., Yan, Y. and Chow, C. W. K. (2008) Effect of polyaluminium chloride on enhanced sorting for the typical organic- polluted

high hardness North-China surface water, *Separation and Purification Technology*, **62**, 401-406.

- [7] Fuente, E. (2003) Mechanism and kinetic of flocculation process in the paper manufacture. Madrid, Spain: Complutense University, PhD Thesis.
- [8] Bob, M. and Walker, H.W. (2001) Enhanced adsorption of natural organic matter on calcium carbonate particles through surface charge modification, *Colloid and Surfaces. A*, **191**, 17-25.
- [9] Bob, M., (2003) Enhanced Removal of Natural Organic Matter During Lime-Soda Softening. Dissertation for Ph.D, Ohio State University, Columbus.
- [10] Csémpesz, F. (2000) Enhanced flocculation of colloidal dispersions by polymer mixtures. *Chemical Engineering Journal*, **80**, 43-49.
- [11] Blanco, A., Fuente, E., Negro, C. and Tijero, J. (2002) Flocculation monitoring: focused beam reflectance measurement as a measurement tool. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **80**, 734-740.
- [12] Rasteiro, M.G.; Garcia, F.A.P.; Ferreira, P.; Blanco, A.; Negro, C.; Antunes, E. (2007) The use of LDS as a tool to evaluate flocculation mechanisms. *Chem. Eng. Process.*, **47**, 1323-1332.